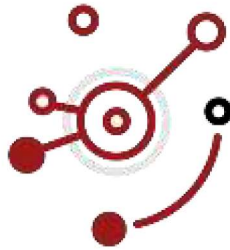


**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAJERA U OSIJEKU**  
**ODJEL ZA FIZIKU**



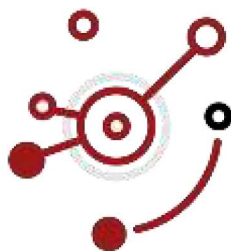
**AZRA KURBAŠIĆ**

**MAGNETSKA LEVITACIJA**

**Završni rad**

**Osijek, 2019.**

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAJERA U OSIJEKU**  
**ODJEL ZA FIZIKU**



**AZRA KURBAŠIĆ**

**MAGNETSKA LEVITACIJA**

**Završni rad**

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku radi stjecanja  
naziva prvostupnice fizike

**Osijek, 2019.**

**„Ovaj završni rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom doc.dr.sc. Denisa Stanića u sklopu Sveučilišnog preddiplomskog studija fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.“**

# Sadržaj

1. Uvod .....	1
2. Povijest.....	2
3. Magnetizam .....	4
4. Magnetska svojstva materijala .....	5
4.1. Dijamagnetizam.....	5
4.1.1. Supravodljivost.....	6
4.2. Paramagnetizam.....	8
4.3. Feromagnetizam .....	9
5. Maglev vlakovi.....	11
5.1. EMS sustav .....	11
5.2. EDS sustav .....	12
6. Zaključak.....	13
7. Literatura .....	14
Životopis .....	15

## **Magnetska levitacija**

**Azra Kurbašić**

### **Sažetak**

Tema ovog završnog rada je magnetska levitacija. Na samom početku dan je kratak povijesni pregled magnetizma, navedena su magnetska svojstva materijala s naglaskom na dijamagnetizmu, zbog toga što se kod dijamagneta uvodi pojam magnetske levitacije. Na samom kraju rada nalazi se poglavlje maglev vlakovi, gdje se želi pobliže objasniti na primjeru primjena magnetske levitacije.

**Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku**

**Ključne riječi:** magnetska levitacija, levitacija, magnetizam, supravodljivost

**Mentor:** doc.dr.sc. Denis Stanić

**Ocjenjivač:** doc.dr.sc. Denis Stanić

**Rad prihvaćen:**

## **Magnetic levitation**

**Azra Kurbašić**

### **Abstract**

Subject of this final thesis is magnetic levitation. In the beginning it contains short historical overview of magnetism. After that comes description of magnetism and magnetic properties of materials with emphasis on diamagnetism. Last part of thesis deals with Maglev trains as an example of application of magnetic levitation.

**Thesis deposited in Department of Physics library**

**Keywords:** magnetic levitation, levitation, magnetism, superconductivity

**Supervisor:** Denis Stanić, PhD

**Reviewers:** Denis Stanić, PhD

**Thesis accepted:**

# 1. Uvod

U današnje vrijeme dolazi do stalnog napretka u tehnologiji što otvara brojna vrata za napredovanje i usavršavanje mnogih izuma. Jedna od važnijih otkrića i primjene je magnetska levitacija. U ovom završnom radu pobliže ćemo se pozabaviti tom temom.

Magnetska levitacija je tehnologija koja je bazirana na magnetizmu u kojem jedan predmet levitira nad drugim bez ikakve mehaničke potpore, samo uz pomoć magnetskog polja. U njemu se djelovanje gravitacijske sile poništava djelovanjem elektromagnetske sile istog intenziteta i iznosa, ali suprotnog smjera čime se postiže lebdjenje. [1]

Pojam levitacija (lat. *levitas* - lakoća) označava proces u kojem se fizikalnim poljem, zračenjem, ultrazvukom, strujanjem plina ili nečim drugim postiže da neki predmet lebdi. [2]

Najšira upotreba magnetske levitacije su magnetsko levitacijski vlakovi. Magnetsko levitacijski vlakovi su trenutno najpopularnija prijevozna sredstva. Stalnim napretkom u tehnologiji dolazi do boljeg razvoja magnetskih materijala i elektroničkih uređaja na principu magnetske levitacije što znači da bi se primjene proširile i na druge sadržaje.

Magnetska levitacija koristi se u različite svrhe kao što su građevinski objekti, prijevozni sustavi (magnetsko levitacijski vlak), obnovljivi izvori energije (vjetrene turbine), oružja (pištolji, rakete), igračke, pisaći pribor i drugo.

Cilj ovog završnog rada je da se pobliže upoznamo s pojmovima kao što su magnetizam, magnetska levitacija, koja su svojstva magneta, i da na osnovu tih pojmova razumijemo princip rada maglev vlakova.



## 2. Povijest

S magnetskom pojavom prvi puta se susrećemo 800. godina prije Krista u Europi i Kini. Grci su otkrili u blizini grada Magnesia crni mineral koji privlači komade željeza, a po tome gradu mineral je nazvan magnetit.

Egipatski arhitekt Kinokrata, prema Plinijevim riječima, prvi je primijenio magnet tako što je započeo gradnju stropa od magnetskog materijala u jednom aleksandrijskom hramu. Time je želio postići da magnetski strop privlači željezni kip, a rezultat toga bi bio da kip lebdi.

Do 100. godine prije Krista, Kinezi su znali da se ravni magnet postavlja u smjeru sjever-jug i da se tako postavljen magnet može okretati, a to je bilo značajno za pomorce kojima je služila kao orijentacija. Prvi kompas ili sinana su napravili Kinezi u 11. stoljeću. Komad magneta bi se izdubio u obliku grabilice za prenošenje juhe, postavili bi ga na ravnu kamenu ploču gdje bi se drška usmjerila prema jugu (Slika 1).



*Slika 1: Model prvobitnog kompasa [4]*



U 13. stoljeću Petrus Peregrinus Maricurtensis prvi je čovjek koji je opisao navigaciju pomoću magnetske igle. Mjerio je silu na površini kuglastog magneta pomoću magnetske igle. Uočio je da crte koje prikazuju magnetnu silu izgledaju kao meridijani Zemlje. Zbog toga je polove koji se sastaju sa Zemljinim nazvao sjevernim i južnim magnetskim polovima. Također je uočio da se istoimeni polovi odbijaju, a raznoimeni da se privlače.

1600. godine liječnik William Gilbert objavio je djelo „De Magnete“ u kojem je iznio svoje saznanje o magnetizmu. Došao je do spoznaje da ukoliko magnetsku iglu podijelimo na više dijelova dobivamo nove magnetske igle.

1820. godine danski kemičar i fizičar, Hans Christian Ørsted uočio je da se magnetska igla okreće okomito na smjer žice kojom teče struja, te je otkrio magnetski učinak električne struje.

Proučavajući Ørstedova otkrića, francuski fizičar, kemičar, matematičar i filozof André Marie Ampère iskazao je Ørstedove rezultate matematički te otkrio pravilo desne ruke. Dva paralelna vodiča kojima teče struja u istom smjeru međusobno se privlače, a odbijaju ako su struje suprotnih smjerova.

Nizozemski matematičar i fizičar Hendrik Antoon Lorentz (1853. – 1928.) postigao je niz otkrića na području elektromagnetizma. Vrlo je značajan pojam koji se prema njemu naziva Lorentzova sila, a koji je opisao kao djelovanje magnetskog i električnog polja na naboj u gibanju.

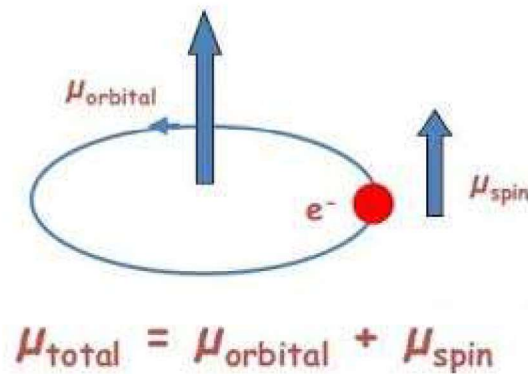
### 3. Magnetizam

Magnetizam je pojava koju primjećujemo kao privlačenje ili odbijanje između magneta i sličnih magnetskih materijala. [5]

Magnetska svojstva tvari posljedica su doprinosa ukupnih magnetskih momenata, orbitalnog magnetskog momenta  $\mu_{orbital}$ , posljedica kretanja elektrona oko jezgre i spinskog magnetskog momenta  $\mu_{spin}$ , posljedica vrtnje elektrona oko vlastite osi;

$$\mu_{total} = \mu_{orbital} + \mu_{spin} \quad (1)$$

Posljedica toga je da se elektroni počinju gibati kao mali magneti.



Slika 2: Smjer i doprinos orbitalnog i spinskog magnetskog momenta [6]

Prema Paulijevom načelu dva elektrona ne mogu istovremeno zauzimati isto kvantno stanje. Udruživanjem atoma u molekule nastoje se popuniti elektronske orbitale gdje tvore elektronske parove, te se magnetski momenti pojedinog elektrona poništavaju. [7] Primjer magneta su prijelazni metali (željezo, kobalt i nikal) koji posjeduju magnetski moment koji nije poništen.

## 4. Magnetska svojstva materijala

Različiti materijali različito se ponašaju pod utjecajem magnetskog polja. Jedan od načina da prikazemo ovisnost između magnetizacije i magnetskog polja dana je izrazom:

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (2)$$

gdje je  $\chi$  magnetska susceptibilnost sustava kojom ćemo izraziti ovisnost materijala o magnetskom polju. Tom veličinom opisujemo svojstvo stvari da mogu biti magnetizirane u magnetskom polju. Slovo  $\vec{H}$  označava jakost vanjskog magnetskog polja. [7]

Magnetska susceptibilnost dana je izrazom:

$$\chi = \chi_r - 1 \quad (3)$$

gdje je  $\chi_r$  relativna magnetska permeabilnost tvari. Za dijamagnetične tvari je negativna dok je za paramagnetične i feromagnetične tvari pozitivna.

Govoreći o magnetskim svojstvima materije, razlikujemo slabe i jake magnete. Slabi magneti su dijamagneti i paramagneti dok su jaki magneti feromagneti, ferimagneti i antiiferomagneti.

### 4.1. Dijamagnetizam

Dijamagnetizam je svojstvo svih materijala i ima vrlo slab oblik magnetizma koji se može uočiti samo uz prisustvo vanjskog magnetskog polja. Ukoliko su u materijalu prisutni drugi oblici magnetizma kao što su paramagnetizam ili feromagnetizam, dijamagnetski doprinos je zanemariv. Kod tvari kod kojih je dijamagnetski učinak najveći nazivaju se dijamagnetski materijali ili dijamagneti.

Dijamagnetizam pokazuju tvari čiji atomi imaju sparene elektronske spinove. [7]

Elementi poput bakra, žive, zlata, bizmuta, većine organskih spojeva i drugi pokazuju svojstvo da je ukupan magnetski dipolni moment određen samo orbitalnim magnetskim momentom jer je spinski magnetski moment jednak nuli.

Kod dijamagneta vektor magnetizacije  $\vec{M}$  proporcionalan je iznosu vanjskog magnetskog polja  $\vec{H}$  [7], a magnetska susceptibilnost manja je od nule:

$$\vec{M} = \chi_d \vec{H} \quad (4)$$

$$\chi_d < 0 \quad (5)$$

Relativna magnetska permeabilnost dijamagneta manja je od jedan:

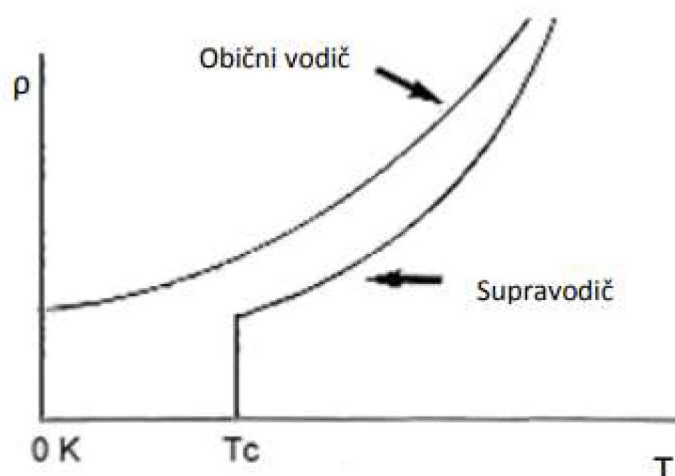
$$\chi_r < 1 \quad (6)$$

Dijamagnetski efekt kod nekih materijala je toliko jak da poništava djelovanje vanjskog magnetskog polja pa oni postaju idealni dijamagneti. Takve materijale nazivamo supravodiči, a pojava koja se kod njih javlja zove se supravodljivost.

#### 4.1.1. Supravodljivost

1911. godine Heike Kamerlingh Onnes je otkrio supravodljivost koja se pojavljuje samo pri vrlo niskim temperaturama. Mjerio je otpor žive pri niskim temperaturama i uočio da pri temperaturi od 4,15 K otpor odjednom nestaje.

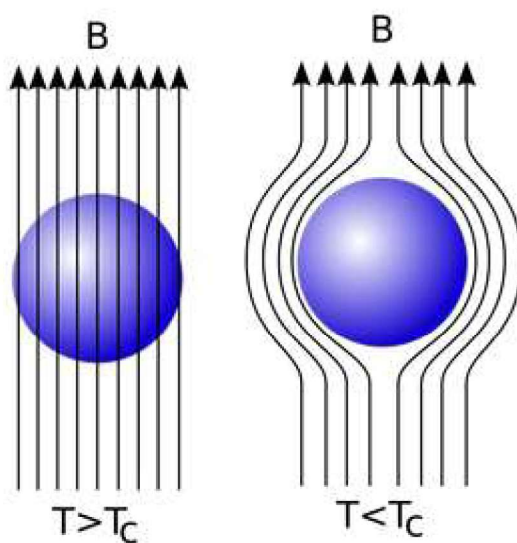
Supravodljivost je fenomen iščezavanja električnog otpora materijala uslijed hlađenja materijala ispod određene temperature. Temperatura na kojoj materijali postaju supravodljivi nazivamo kritičnom temperaturom  $T_c$ . [9]



Slika 3: Dijagram supravodljivosti [10]



Supravodljivost ovisi o tri parametra, a to su kritična temperatura, kritična gustoća struje i kritično magnetsko polje. Ukoliko se materijal ohladi ispod kritične temperature tada postaje supravodljiv, a stavljanjem u magnetsko polje ono neće imati nikakav utjecaj na unutrašnjost materijala. Unutar materijala ukupno magnetsko polje jednako je nuli, a takvo ponašanje u supravodljivom materijalu naziva se Meissnerov efekt. [11]



Slika 4: Magnetske silnice u supravodiču iznad i ispod kritične temperature  $T_c$  [11]

Ukoliko je zadovoljen uvjet:

$$\vec{M} = -\vec{H} \quad (7)$$

tada je magnetsko polje jednako nuli.

Važno svojstvo supravodiča je levitacija magneta iznad supravodiča koji je ohlađen ispod svoje kritične temperature. Ukoliko magnet približimo supravodiču inducira se struja koja stvara magnetsko polje. Magnetska polja magneta i supravodiča se odbijaju, a to rezultira da magnet levitira.



Slika 5: Levitacija magneta iznad supravodiča [12]

## 4.2. Paramagnetizam

Paramagnetične tvari sastoje se od atoma ili molekula kod kojih je jedan spinski magnetski moment različit od nule. Kada atomi ili molekule imaju nesparene elektronske spinove to je moguće ostvariti.

Kada uključimo magnetsko polje u tvari se pojavljuje dijamagnetični efekt. Tada se istodobno spinski magnetski momenti nastoje usmjeriti paralelno magnetskom polju. To je uzrok pozitivnog induciranog magnetskog polja unutar tvari  $\vec{B}$ . Ukoliko nema vanjskog magnetskog polja, magnetski dipoli orijentirani su kaotično.

Inducirano magnetsko polje u tvari ovisi o temperaturi jer termičko gibanje ometa usmjeravanje magnetskih dipola. Iznos  $\vec{B}$  se smanjuje povećanjem temperature. Zato je magnetska susceptibilnost vrlo mala i obrnuto proporcionalna temperaturi:

$$\chi_d > 0 \quad (8)$$

$$\chi_r > 1 \quad (9)$$

Ukoliko isključimo djelovanje vanjskog magnetskog polja magnetski dipoli se ponovno orijentiraju nasumično.

### 4.3. Feromagnetizam

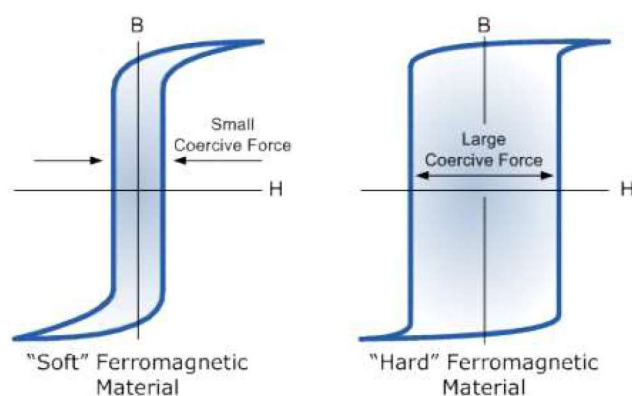
Feromagnetizam je oblik magnetizma, koji se javlja kod željeza, kobalta, nikla i određenih legura napravljenih od neferomagnetskih materijala.

Svaki feromagnetski materijal sastoji se od domena, kao posljedica nesparenih elektronskih spinova koji se udružuju u mikroskopska područja

Ukoliko feromagnetski materijali nisu smješteni u magnetskom polju ili se ne ponašaju kao stalni magneti, domene su orijentirani u različitim smjerovima te je magnetski moment jednak nuli:  $M = 0$

Unošenjem feromagnetskih materijala u magnetsko polje, dolazi do usmjeravanja magnetskih momenata (Weissovih domena) što rezultira magnetiziranjem materijala. Posljedica orijentacije domena je pojava induciranog magnetskog polja koje je za nekoliko redova veličine veće nego kod paramagnetskih materijala.

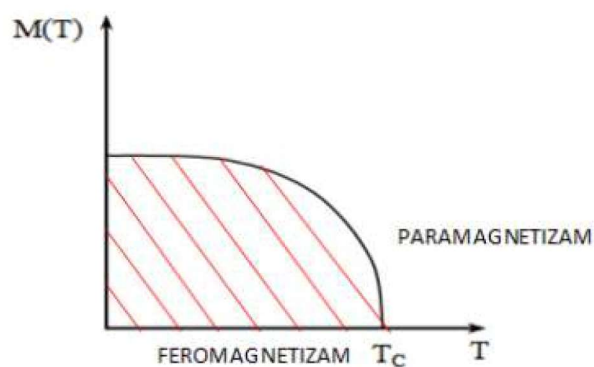
Ukoliko su feromagneti izloženi jakom vanjskom magnetskom polju težiti će k tome da ostanu namagnetizirani, takve domene ostaju trajno sinkronizirane i nastaje permanentni magnet. Taj učinak naziva se histereza. Po obliku petlje histereze, feromagnetske materijale možemo podijeliti u tvrde i meke.



Slika 6: Krivulja histereze [15]



Svi feromagnetski materijali imaju maksimalnu temperaturu do koje su feromagnetska svojstva prisutna, a na još višim temperaturama svojstva nestaju kao posljedica termalne pobude. Ta temperatura naziva se Curierova temperatura. Ukoliko temperatura feromagneta bude viša od Curierove temperature, tada se materijal počinje ponašati kao paramagnet.



Slika 7: Ovisnost magnetizacije  $M$  o temperaturi  $T$ : na temperaturi  $T < T_c$  tvar je feromagnet, a na temperaturi  $T > T_c$  tvar je paramagnet [16]

## 5. Maglev vlakovi

Izumitelji diljem svijeta su početkom 19. stoljeća željeli zamijeniti uobičajeni željeznički prijevoz bržom verzijom. Tako započinje razvoj magnetsko levitirajućih vlakova (engl. Magnetic Levitation, Maglev). Tijekom niza godina pokušalo se doći do ideje i razvoja ovakvog motora. Mnogi znanstvenici poput Alfreda Zehdena, Erica Laitwaitea i Hermanna Kempera su radili na ideji i izgradnji motora. Upravo Herman Kemper 1922. godine započinje istraživanje magnetske levitacije koje traje sve do 1933. godine, kada je izložio „plutajuće“ vozilo temeljeno na principu elektromagnetske privlačnosti. Kemperu 1941. godine polazi za rukom te razvija koncept prijevoza te dostupnost tehnologije Magleva. Nakon toga sve do 1969. godine nije bilo značajnijeg pomaka u razvoju Maglev tehnologije.

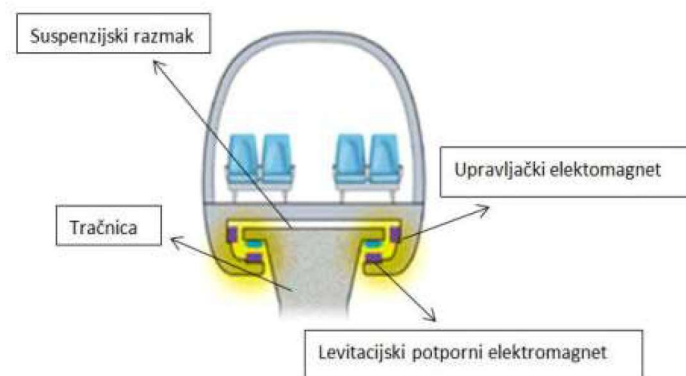
Zbog povećanosti cestovnog i zrakoplovnog prometa, ali i želje za postizanjem novih ekonomičnijih, udobnijih i bržih prijevoznih sredstava, Njemačka, Francuska i Japan aktivno su razvijali sustav brzih vlakova. Nakon dugog niza godina istraživanja i razvoja Maglev postaje dio urbanog načina života.

Sustavi Maglev vlakova dijele se u dvije skupine, elektromagnetska suspenzija (ElectroMagnetic Suspension-EMS) i elektrodinamička suspenzija (ElectroDynamic Suspension-EDS). Tri primarne funkcije Maglev tehnologije su levitacija, propulsija i upravljanje, a magnetske sile su te koje izvode sve tri uz pomoć jakih magneta. Za EMS sustave, magneti se nalaze unutar samog vozila, dok su za EDS sustave magneti postavljeni unutar tračnica. [17]

### 5.1. EMS sustav

Najuspješniji EMS Maglev vlak naziva se Transrapid sustav.

Elektromagnetska suspenzija ili EMS zasniva se na privlačnoj sili koja se javlja između elektromagneta u vozilu i tračnice. Suspenzijski elektromagnet u vozilu smješten je ispod tračnice koji proizvodi magnetsko polje i time privlači tračnice. Magneti „guraju“ vozilo prema gore te na taj način ono levitira, a razmak između elektromagneta i elektromagnetske tračnice iznosi 8-10 mm. Vlak se pokreće pomoću linearnog motora, a suspenzijski razmak, koji iznosi oko 150 mm, ostaje stalan uz pomoć kontrole pobudne struje suspenzijskog elektromagneta. Možemo i napomenuti da je magnetsko polje unutar vlaka zanemarivo.

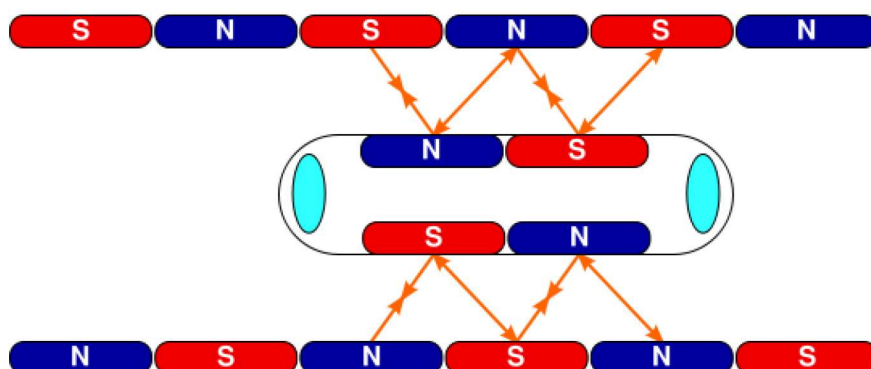


Slika 8: Prikaz EMS-a [18]

## 5.2. EDS sustav

Japanski magnetski vlakovi, za razliku od Njemačkih vlakova, koriste EDS sustav koji se temelji na supravodljivoj tehnologiji. Na tračnici se nalazi magnetizirana zavojnica koja omogućava vlaku da levitira iznad tračnice u razmaku od 1 do 10 cm. Električna struja koja se dovodi u zavojnice unutar vodilica neprestano se izmjenjuje kako bi se uspostavila promjena polariteta magnetiziranih zavojnica. Ta promjena polariteta uzrokuje to da magnetsko polje koje se nalazi ispred vlaka, vuče vlak unaprijed dok magnetsko polje iza vlaka dodaje dodatni, veći potisak prema naprijed.

Kada se vlak kreće, pomično magnetsko polje magneta pobuđuje induciranu struju u levitacijskim zavojnicama (to su uvijek supravodljive zavojnice s niskim temperaturama ili trajni magneti) ugrađenim u liniju. Pomično polje u interakciji s induciranom strujom stvara silu koja gura vlak prema gore i on levitira iznad tračnica na određenoj visini.



Slika 9: EDS sustav [18]

## Zaključak

Upoznavši se s pojmom magnetske levitacije, na najjednostavniji način opisan je princip rada Maglev vlakova kao primjer praktične uporabe magnetske levitacije. Iako je tehnologija Maglev vlakova prisutna od 1960. godine, danas se u praksi kao pogon koriste samo dva Maglev vlaka koja smo kratko opisali (EMS i ESD sustav). Posebnost ovih vlakova je što vlak pri gibanju ne dodiruje tračnice već lebdi, a time dolazi do smanjenja trenja čime se skraćuje vrijeme putovanja. Osim u prijevozne svrhe, magnetsku levitaciju moguće je koristiti i u proizvodnji igračaka, kućanstvu, tvornicama ili u nuklearnom inženjeringu što nije bio predmet istraživanja ovog rada.

Maglev vlakovi su izrazito popularni u Njemačkoj, Francuskoj i Japanu zbog potrebe za bržim načinom prijevoza putnika, robe ili sirovina. Japanska kompanija JR East postigla je trenutni eksperimentalni rekord brzine od 603 km/h. [19] Samo za usporedbu, prosječna brzina vlakova u Republici Hrvatskoj je oko 46 km/h. [20]

Ovakva tehnologija je izrazito skupa te trenutno nije profitabilna. Iako mnogi najavljuju smanjenje troškova uz mnoštvo high-tech prijedloga za sada je potreban veliki broj putnika koji bi se vozili na dužim relacijama kako bi ovi vlakovi postali komercijalno isplativi.



## 6. Literatura

- [1] Magnetic levitation, dostupno na: <https://bit.ly/2mXA6lP> , [Pristupljeno: 11.8.2019.]
- [2] Levitacija, dostupno na: <https://bit.ly/2nzgK6L> , [Pristupljeno: 22.7.2019.]
- [3] Faj, Z. Pregled povijesti fizike. Drugo, dopunjeno izdanje. Osijek. Pedagoški fakultet, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 1999.
- [4] Sinan kompas, dostupno na: <https://7.ly/a6JOt>, [Pristupljeno: 24.7.2019.]
- [5] Magnetizam, dostupno na: <https://www.shrunken.com/a6JOv>, [Pristupljeno: 23.7.2019.]
- [6] Orbitalni i spinski moment, dostupno na: <https://bit.ly/2nzBBa5>, [Pristupljeno: 24.7.2019.]
- [7] Šips, V. Uvod u fiziku čvrstog stanja, Školska knjiga, Zagreb, 1991
- [8] Magnet, dostupno na: <https://bit.ly/2lnGMJl>, [Pristupljeno: 22.7.2019.]
- [9] Supravodljivost, dostupno na: <https://bit.ly/2ns58Cn>, [Pristupljeno: 23.7.2019.]
- [10] Supravodljivost, dostupno na: <https://bit.ly/2m1pZMs>, [Pristupljeno: 23.7.2019.]
- [11] Griffiths, D.J. Introduction to electrodynamics. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- [12] Meissnerov efekt, dostupno na: <https://bit.ly/2nzodCQ>, [Pristupljeno: 23.7.2019.]
- [13] Magnetic levitation, dostupno na: <https://bit.ly/2lqWe7J>, [Pristupljeno: 11.8.2019.]
- [14] Paramagnetizam, dostupno na: <https://bit.ly/2m3ZPbX>, [Pristupljeno: 23.7.2019.]
- [15] Hirstersa curve, dostupno na: <https://bit.ly/2ljVJMu>, [Pristupljeno: 23.7.2019.]
- [16] EMS maglev, dostupno na: <https://bit.ly/2n1V2I4>, [Pristupljeno: 11.8.2019.]
- [17] Valentina Đurin, Maglev- najbrža željeznica na svijetu: Diplomski rad, Zagreb: dostupno na <https://bit.ly/2ltiRbE>, [Pristupljeno: 11.8.2019.]
- [18] Babić, I. Čikeš, T. Alternativne tehnologije propulzije na željeznicu. Seminarski rad. Rijeka: Pomorski fakultet u Rijeci, 2011.
- [19] Yaghoubi, H. Practical Applications of Magnetic Levitation Tehnology. Final report. Teheran: IMT, 2012.
- [20] The Japanese Maglev: World's fastest bullet train, dostupno na: <https://bit.ly/2ltk9O>, [Pristupljeno: 22.9.2019.]
- [21] Prosječna brzina vlakova u Hrvatskoj: <https://bit.ly/2nxw0AZ> , [Pristupljeno: 23.9.2019.]

## **Životopis**

Azra Kurbašić rođena je 18.1.1997. godine u Virovitici, u Republici Hrvatskoj. Pohađala je Osnovnu školu Voćin u Voćinu. Po završetku osnovne škole upisuje Opću gimnaziju Marka Marulića u Slatini koju je završila 2015. godine. Iste godine upisuje preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, koji i trenutno pohađa.